

# e-Science 기반 EDISON\_CFD 포탈의 항공우주분야 교육·연구용 유체역학 소프트웨어 및 콘텐츠 개발

Development of e-Science-based Fluid Dynamics Software and Contents for Education  
and Research in Aerospace Engineering on the EDISON\_CFD Portal

이성욱<sup>1\*</sup>, 이근배<sup>2</sup>, 오세종<sup>3</sup>, 최성임<sup>4</sup>, 박수형<sup>5</sup>, 김종암<sup>1</sup>

서울대학교 기계항공공학부<sup>1</sup>, 서울대학교 협동과정 계산과학전공<sup>2</sup>, 부산대학교 항공우주공학과<sup>3</sup>,  
한국과학기술원 항공우주공학과<sup>4</sup>, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과<sup>5</sup>

## 초 록

EDISON\_CFD는 EDucation-research Integration through Simulation On the Net과 Computational Fluid Dynamics의 약자로 e-Science 인프라 기반의 항공우주분야 유체역학 교육·연구 환경을 지칭한다. 항공우주분야 유체역학 관련 연구는 다양한 국책사업들을 통해 많은 성과가 도출되었으며, 국내 대학을 비롯한 정부출연연구소 및 산업체에 많은 성과들이 축적되고 있다. 그러나 첨단 기술을 학생들에게 전달하기 위한 교육 콘텐츠는 매우 부족하다. 본 연구에서는 항공우주분야의 연구 성과를 활용하고 e-Science 기술의 장점을 극대화하여, 온라인상에서 활용 가능한 유체역학 관련 교육·연구용 SW 및 콘텐츠를 개발하고자 한다. 이를 통해 유체공학 분야 대학(원)생의 전산 해석 및 설계기술 적응력을 제고하고, 향후 국가 과학기술경쟁력을 높이는 우수한 연구 인력을 양성할 수 있을 것으로 기대한다.

## ABSTRACT

EDISON\_CFD, an abbreviation of 'EDucation-research Integration through Simulation On the Net for Computational Fluid Dynamics', is a virtual organization in the e-Science environment to support education & research of fluid dynamics in aerospace engineering and related fields. Through national research projects, many valuable R&D results have been developed and accumulated in universities, industries, and research institutes. However, the educational contents for delivering advanced technologies to students still lack. The present work aims to establish the open platform of simulation software and contents for online education & research using results of the state-of-the-art techniques in aerospace engineering. This will fortify not only the capability of students but also the national strength in the fields of fluid engineering.

Key Words : EDISON\_CFD(에디슨\_전산유체역학), e-Science(이사이언스), Aerospace Fluid Engineering(항공우주 유체공학), Software and Contents for Education and Research(교육·연구용 소프트웨어 및 콘텐츠)

## 1. 서 론

항공우주분야에서 유체역학은 정지 또는 운동하고 있는 유체의 성질을 다루는 응용과학의 일부로서 유체의 운동을 분석하거나 유체와 비행체 상호간에 작용하는 힘의 관계를 연구하는 분야이다. 이러한 분석을 통해 비행체를 설계·제작할 수 있는 방법론을 연구·제시하는 분야이므로 항공우주산업 전반에 걸쳐 활발히 활용되어 왔고, 그

활용도가 점차 확대되고 있는 추세이다. 한 예로 비행체가 안정성을 유지하며 적은 연료로 오랫동안 운항하도록 하기 위해, 풍동실험 및 수치해석 등의 다양한 접근방법으로 최적 형상을 설계하기 위한 노력을 기울이고 있다.

그동안 정부에서는 항공우주분야 과학기술경쟁력을 높이기 위해서 R&D 연구비를 수년간 많이 증액했으며, 질적인 수준에서도 비약적으로 발전

하고 있다. 정부출연연구소뿐만 아니라, 고등교육 기관인 대학에서도 각종 연구 사업을 통해 많은 연구 성과들이 축적되어 왔다. 항공우주 유체역학 분야의 우수한 신기술 개발 및 연구 인력양성은 정부의 연구사업 지원에 대한 긍정적인 결과라고 할 수 있다.

정부출연연구소 및 국내 대학들의 연구능력이 증대되었고, 규모와 첨단성 면에서 비약적인 발전이 이루어지고 있음에도 불구하고, 그 연구결과들이 교육현장에서 직접 활용되는 사례가 많지 않은 문제점이 있다. 따라서 우수한 연구결과를 고등교육 현장에 적시 활용할 수 있는 체계를 구축하여 활용함으로써 항공우주분야 교육경쟁력을 강화해야 할 필요성이 다양하게 대두되고 있다.

항공우주분야의 유체역학 연구는 크게 실험·이론·수치해석 분야로 나눌 수 있다. 이론 분야의 경우 연구 성과의 대부분이 논문으로 창출되기 때문에 학부 혹은 대학원 교육 과정에 직접 연계하기가 어려우며, 실험 분야의 경우 비용이 막대하고 실험 대상이 한정적이기 때문에 연구 결과를 교과과정에 연계하여 활용하기에는 제한적인 측면이 있다. 그러나 수치해석을 활용한 연구는 해석 대상을 자유롭게 모델링할 수 있고, 비교적 빠른 시간에 해석 결과를 얻을 수 있기 때문에 교과과정에 따라 다양하게 응용 가능한 장점을 갖고 있다. 또한 SW (software) 의 사용법만 익히면 내부의 복잡한 방정식들의 연산과정을 모르더라도 이를 활용한 최종 시뮬레이션 결과를 확인하고, 간접적인 물리적 경험과 개념을 체득할 수 있으므로 연구 성과와 교육의 유기적 융합에 가장 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 항공우주분야의 최신 수치 시뮬레이션 연구 성과와 최근 각광 받고 있는 IT 기술인 e-Science 기술<sup>(1~3)</sup>의 장점을 극대화하여, 항공우주분야 유체역학 교육·연구를 위한 가상 환경인 EDISON\_CFD (EDucation-research Integration through Simulation On the Net for Computational Fluid Dynamics) 시스템을 소개하고, 온라인상에서 활용 가능한 심층 교육·연구용 SW 및 콘텐츠를 개발하고자 한다.

## 2. 교육·연구용 SW 및 콘텐츠

### 2.1 압축성/비압축성 유동 해석을 위한 범용 SW 및 교육용 콘텐츠

EDISON\_CFD 교육·연구 시스템과 같이 다양한 수준의 학생과 연구자가 접속하는 환경에서 다수의 문제를 다루어야 하는 유체역학 시뮬레이션을 위해서는 일정 범위의 범용 해석을 위한 SW가 필수적으로 개발 되어야 한다. 범용 SW의 개발은 유체역학의 수치해석에 관한 일정 수준의 이해와 노력을 바탕으로, 대학(원)생들이 자신의 연구와 창의적 아이디어를 구현해 볼 수 있도록 하는데 초점을 둔다.

본 시스템에서는 2차원의 다양한 형상에 대한 정렬/비정렬격자 기반의 점성/비점성, 정상/비정상 상태의 해석이 가능한 압축성/비압축성 유동해석 SW를 제공한다.

현재 탑재된 SW의 주요 특징은 다음과 같다. 압축성 유동해석 SW의 경우, 공간차분은 유한차분법 기반의 Roe, RoeM 기법과, 플럭스 벡터분할법 기반의 AUSM, AUSMPW+ 기법에 2차 단조성 보존 내삽법을 사용하였다. 비압축성 유동해석 SW의 경우, 인공 압축성 (artificial compressibility) 을 기반으로 공간차분은 풍상차분법에 2차 단조

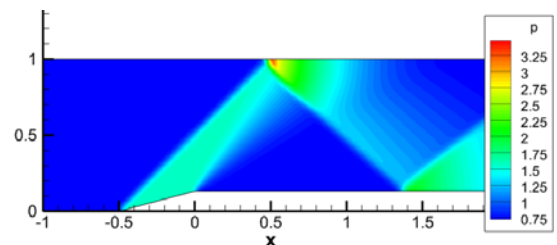


Fig. 1. Pressure contour of double shock reflection, (Mach number = 2.0, Angle of wedge = 15°)

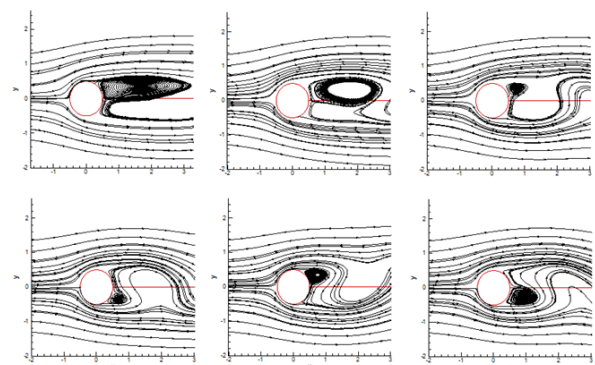


Fig. 2. Streamline over a circular cylinder, (Re = 140)

성 보존 내삽법을 사용하였다. 시간적분은 두 SW 모두 외재적 Euler 기법, 다만 Runge-Kutta 시간 적분법, 내재적 LU-SGS 방법을 사용하였다. 또한, 난류 유동장 해석을 위하여 Standard k- $\epsilon$ , Wilcox's k- $\omega$ , Menter's k- $\omega$  SST 등의 옵션을 선택할 수 있도록 하였다. 적용된 수치기법의 자세한 내용은 참고문헌<sup>(4,5)</sup>에 기술되어 있다.

본 SW를 활용하여 유체역학 교육에 활용 가능한 전형적인 예제로는 Fig. 1, 2와 같은 경사 충격파와 유동 해석 및 실린더 후류 유동 해석 등을 들 수 있다. 또한 본 연구에서는 유체역학 관련 수업에 적극 활용할 수 있도록 개발 SW와 연계된 교육용 콘텐츠를 개발한다. 교육용 콘텐츠는 대략 90분 강의용으로 구성되며, 해당 교과 이론에 관한 소개, 이론의 이해를 돕기 위한 개발 SW를 활용한 시뮬레이션 결과, 학생들이 직접 시뮬레이션을 할 수 있도록 구성된 스크립트와 매뉴얼로 구성된다.

압축성 유동해석 SW를 활용한 교육용 콘텐츠의 한 예로, '썰기가 있는 관내 경사 충격파 해석'을 들 수 있다. 주요 내용은 Fig. 3과 같이 압축성 유동의 특성 및 경사충격파와 팽창파가 발생하는 원리를 설명하는 이론 학습 과정, 다양한 각도와 형태를 갖는 썰기 형상 및 격자를 제작하고 SW를 활용하여 시뮬레이션 할 수 있는 계산 실습 과정, 계산 결과를 바탕으로 썰기 경사각에 따른 유동의 변화를 고찰하는 과정으로 구성된다.

해당 콘텐츠의 대상 교과목은 학부 과정의 압축성 유체역학 및 고급유체역학과 대학원 과정의 전산유체역학 등에 활용할 수 있다.

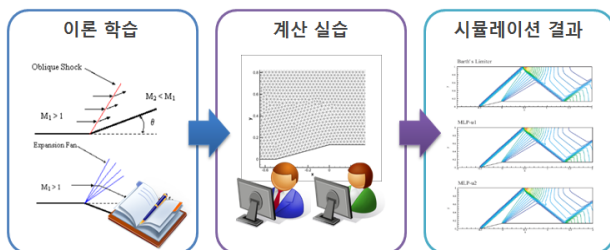


Fig. 3. Process of educational contents for simulation of an oblique shock on wedge

## 2.2 .패널 기법 기반 유동 해석 SW 및 교육용 콘텐츠

대학(원)생을 대상으로 하는 수치해석 기반 시뮬

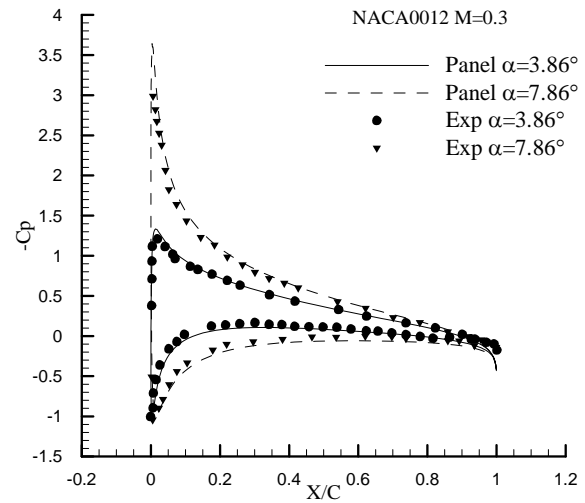


Fig. 4. Pressure coefficient distribution over a NACA0012 airfoil (comparison between source doublet method and experiment<sup>(6)</sup>)

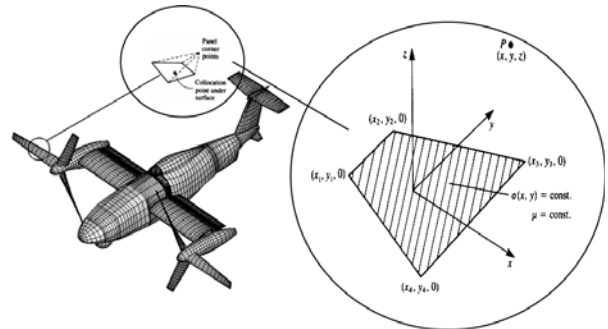


Fig. 5. 3-D source and doublet panel<sup>(7)</sup>

레이션 SW는 일정 수준 이상의 해석 정확도와 빠른 해석 결과의 산출이 요구된다. 오늘날, 요구되는 해석 정확도와 높은 계산 효율성을 확보하기 위해 유체역학적 해석 분야에서 패널 기법이 활발히 적용되고 있다. 이를 고려하여 본 시스템에서는 패널 기법 기반의 유동 해석 SW 및 교육용 콘텐츠를 제공한다.

본 SW는 이상 유동 (ideal flow) 해석을 위한 패널 기법을 기반으로 하며, Fig. 4, 5와 같이 2차원 및 3차원 물체에 대한 정상/비정상 이상 유동 해석이 가능하다. 또한 박리점 예측을 포함하는 경계층 이론과 프렌틀-글라우트 (Prandtl-Glauert) 변환 등을 적용하여 유체의 점성 효과 및 압축성 효과의 고려도 가능하다.

본 SW를 활용한 교육용 콘텐츠는 학부 및 대학원의 교과과정에 맞추어, 통용되는 교과서의 예

제 중심으로 개발하여 대학(원)생의 수업 집중력을 높이고, 이해도를 증진시킬 수 있도록 한다. 특히 수학적 유도 과정의 복잡성으로 인한 이해도의 저하를 교육용 콘텐츠의 활용을 통해 충당할 수 있도록 한다.

교육용 콘텐츠는 앞서 언급한 것과 같이 교과 이론에 관한 소개, 개발 SW를 활용한 시뮬레이션 결과, 학생들이 직접 사용할 수 있도록 구성된 스크립트와 매뉴얼로 구성된다.

해당 콘텐츠의 대상 교과목은 학부 과정의 유체역학, 항공역학 등의 기초 교과와 대학원 과정의 전산유체역학 등에 활용할 수 있다.

### 2.3 층류/난류 경계층 유동 해석 SW 및 교육용 콘텐츠

본 시스템에서 제공되는 층류/난류 경계층 시뮬레이션 SW의 특징은 다음과 같다. 본 SW는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 해석을 기반으로 하였으며, 정렬격자 기반의 다양한 형상 주위의 정상/비정상 층류/난류 유동 해석이 가능하다. 지배방정식은 격자 중심 유한 체적법을 사용하여 공간 이산화를 하였고, 격자 경계면에서의 비점성 유속 (inviscid flux) 계산을 위해 Roe flux, HLLE flux, AUSM+, FDM WENO, MUSCL WENO의 방법 등을 사용할 수 있다. 난류 해석을 위해 다양한 난류 모델을 선택할 수 있게 하였으며, 사용자가 선택할 수 있는 난류 모델에는 Spalart-Allmaras, Wilcox  $k-\omega$ , Launder-Sharma-Craft  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  SST (Shear-Stress Transport),  $k-\omega$  Wilcox-Durbin+ 모델<sup>(8-12)</sup> 등이 있다. Fig. 6은 난류모델에 따른 경계층의 속도분포를 나타내는 그림이고, Fig. 7은 난류모델에 따른 표면 마찰계수 분포를 비교한 그림이다. 특히 경계층 해석을 위해, 소격자 스케일 (subgrid scale)을 고려한 경계층 내부의 최대 격자간격을 고려하여 격자가 구성되며, 내부 유동의 경우 입구 유동 정보를 추가로 입력받게 된다.

본 SW를 활용한 교육용 콘텐츠의 예로, ‘압축성 경계층 이론과 시뮬레이션’을 들 수 있다. 주요 내용은 압축성 경계층 이론과 층류 및 난류 경계층의 특성, 충격파-경계층 상호작용을 설명하는 이론 학습 과정, 격자를 제작하고, SW가 제공하는 다양한 난류 모델을 선택하여 시뮬레이션을

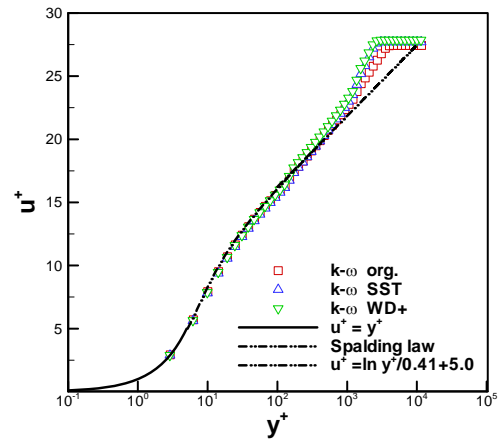


Fig. 6. Turbulent boundary layer profile

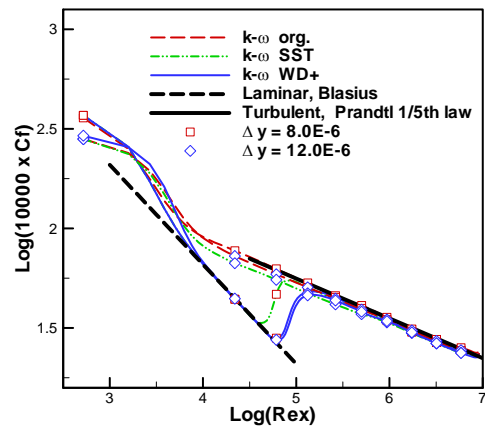


Fig. 7. Skin friction coefficient distribution

수행하는 계산 실습 과정, 계산 결과를 바탕으로 층류/난류에 따른 표면 마찰력 변화, 난류 모델에 따른 해석 결과의 변화, 충격파-경계층 간섭 효과를 고찰하는 과정으로 구성된다.

해당 콘텐츠의 대상 교과목은 학부 과정의 유체역학, 항공역학, 압축성 유체역학과 대학원 과정의 점성유체역학, 전산유체역학 등에 활용할 수 있다.

### 2.4 최적설계 프레임워크 SW 및 교육용 콘텐츠

EDISON\_CFD 교육·연구 시스템에는 다양한 종류의 유동 해석 SW를 포함하는 한편, 이를 활용하는 최적설계 관련 SW 및 교육용 콘텐츠가 제공된다. 최적설계는 Fig. 8과 같이 응용 수학에서의 최적화 알고리즘과 기존의 유동 해석 SW, 그

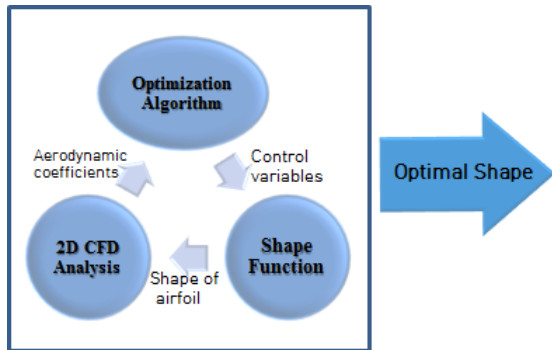


Fig. 8. Design optimization framework  
(2-D airfoil design optimization)

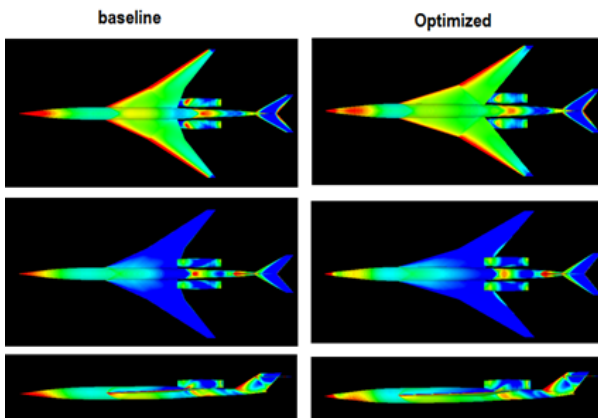


Fig. 9. Design optimization of  
supersonic business jet

리고 이들 사이의 형상에 대한 정보 (표면 함수 정의와 격자 변형)를 포함한 데이터베이스 전달 구조 등이 하나로 통합된 프레임워크로 구성된다. EDISON\_CFD 시스템의 유동 해석 SW 및 데이터베이스는 최적설계 프레임워크에 그대로 통합될 수 있기 때문에 활용성이 매우 우수하다. 또한 응용 수학에서의 여러 최적설계 방법을 다룸으로써 유체뿐만 아니라, 건축, 기계, 조선 등의 여러 공학 분야의 구조 및 제어 문제로까지 확대 가능한 점으로 인해, 다양성과 효율성을 동시에 획득할 수 있다.

특히, 최적설계 분야에 대한 교육이 일반적으로 대학원 수준의 교육과정에서 이루어지는 현실을 감안할 때, 학부 교육과정 수준에서 사용자가 상대적으로 쉽게 이론을 이해하고, 관련 SW 및 콘텐츠를 활용할 수 있도록 최적설계 프레임워크 및 인터페이스의 쉬운 접근성에 주안점을 두고 제공된다.

또한 SW 개발 초기 단계에서부터 최적설계 프

레이워크 SW의 응용성 및 확장성이 고려되므로, 추후에는 Fig. 9와 같은 초음속 여객기의 공력 최적설계에까지 응용이 가능하다.<sup>(13)</sup>

본 시스템에서는 현재 공학 설계가 직면하고 있는, 수많은 설계 변수들 간의 상호 연관 관계, 민감도 해석, 불확정성이 고려된 데이터 분석 기법 등에 대해서도 다루고자 한다. 최적설계의 기본이 되는 여러 최적화 알고리즘을 소개하며, 설계 변수의 특성, 목적 함수의 정의 및 조건 함수의 만족성 (feasibility)에 관한 교육 콘텐츠가 제공된다.

우선, 유한 차분법, 자동 미분법, 복소수 차분법, 매개변수 (adjoint variable) 차분법 등의 민감도 해석 기법을 바탕으로 하는 구배율 기반의 최적화 알고리즘 SW를 제공한다. 구배율 기반의 최적화 알고리즘 SW를 활용한 교육 콘텐츠의 예로, ‘민감도 해석 및 파라미터 스터디’ 및 ‘2차원 익형 공력 최적설계’ 등을 들 수 있다. 주요 내용은 압축성 유동의 특성 및 양력과 항력의 발생 원리, 익형의 형상에 따른 특성 등을 설명하는 이론 학습 과정, 다양한 형상 함수와 기저 형상을 바탕으로 최적설계 SW를 활용하여 시뮬레이션 할 수 있는 실습 과정, 최적설계 결과를 바탕으로 기저 형상과 최적설계 형상의 비교분석을 통해 결과의 타당성을 고찰하는 과정으로 구성된다.

해당 콘텐츠의 대상 교과목은 학부 과정의 항공역학 및 압축성 유체역학과 대학원 과정의 전산 유체역학 등에 활용할 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 항공우주분야의 수치 시뮬레이션 연구 성과를 활용하고, e-Science 기술의 장점을 극대화하여, 온라인상에서 활용 가능한 항공우주분야 교과과정 관련 교육·연구용 SW 및 콘텐츠를 개발하는 것을 그 목표로 하였다. 특히, 항공우주분야와 관련된 교육·연구용 SW 및 콘텐츠는 크게 압축성/비압축성 유동해석, 이상 유동 해석, 층류/난류 경계층 유동 해석, 최적설계 프레임워크 SW 및 콘텐츠로 나누어 개발하였다.

본 EDISON\_CFD의 SW 및 콘텐츠 개발을 통해, 항공우주분야 대학(원)생의 최신기술 적응력을 제고하고, 향후 기술경쟁력을 높이는 우수한 연구인력을 양성하며, 장기적으로 시뮬레이션 SW의



국산화에도 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후기

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스 교육허브개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (2011-0020558, 2011-0020559, 2011-0020560, 2011-0020565)

## 참고문헌

- (1) Kim, J-H, Yi, J., Ko, S-H, Ahn, J. W., Kim, C., Kim, Y. and Cho, K. W., 2008, "e-AIRS: Construction of an Aerodynamic Integrated Research System on the e-Science Infrastructure," *J. KSAS*, Vol. 36, No. 5, pp. 438~447
- (2) Ko, S-H, Han, S., Kim, J-H, Moon, J. B., Kim, C., Cho, K. W. and Kim, Y., 2009, "Integrated rocket simulation of internal and external flow dynamics on the e-Science environment," *J. Korean Phy. Soc.*, Vol. 55, No. 5, pp. 2166~2171
- (3) Kim, J-H and Kim, C., 2009, "Numerical investigation on the geometric factors of insects' wing motion using e-Science environment," *J. Korean Phy. Soc.*, Vol. 55, No. 5, pp. 2172~2179
- (4) Rogers, S. E. and Kwak, D., 1990, "Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations," *AIAA J.*, Vol. 28, No. 2, pp. 253~262.
- (5) Kim, K. H., Kim, C. and Rho, O-H, 2001, "Methods for the accurate computations of hypersonic flows. I. AUSMPW+ scheme," *J. Comput. Phys.*, Vol. 174, No. 1, pp. 38~80.
- (6) Back, S. W., Yee, K. J. and Oh, S. J., 2009, "Prediction of Rime Ice Accretion Shape on 2D Airoil," *J. KSCFE*, Vol. 14, No. 1, pp. 45~52.
- (7) Lee, J. W., Yee, K. J. and Oh, S. J., 2006, "The Aerodynamic Analysis of Helicopter Rotors by Using an Unsteady Source-Doublet Panel Method," *J. KSAS*, Vol. 34, No. 6, pp. 1~9.
- (8) Park, S. H. and Kwon, J. H., 2004, "Implementation of k-w Turbulence Models in an Implicit Multigrid Method," *AIAA J.*, Vol. 42, No. 7, pp. 1348~1357.
- (9) Wilcox, D. C., 1988, "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA J.*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299~1310.
- (10) Thivet, F. Knight, D. D., Zheltovodov, A. A. and Maksimov, A. I., 2001, "Insights in Turbulence Modeling for Crossing-Shock-Wave/Boundary-Layer Interactions," *AIAA J.*, Vol. 39, No. 6, pp. 985~995.
- (11) Durbin, P. A., 1996, "On the k-e Stagnation Point Anomaly," *Inter. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 17, No. 1, pp. 89~90.
- (12) Menter, F. R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA J.*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.
- (13) Choi, S., Alonso, J., Kroo, I. M. and Wintzer, M., 2008, "Multi-Fidelity Design Optimization of Low-Boom Supersonic Jets," *J. Aircraft*, Vol. 45, No. 1, pp. 106~118.